

嚥下運動下の嚥下物の数値流体力学的解析

著者	太田 淳
号	89
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	医博第3947号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00129348

氏 名	おおた じゅん 太田 淳
学 位 の 種 類	博士 (医学)
学位授与年月日	令和元年 9 月 25 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項
研 究 科 専 攻	東北大学大学院医学系研究科 (博士課程) 医科学専攻
学位論文題目	嚥下運動下の嚥下物の数値流体力学的解析
論文審査委員	主査 教授 香取 幸夫 教授 出江 紳一 教授 神宮 啓一

論文内容要旨

[背景] 嚥下運動とは口腔・咽頭・食道の神経制御下の複雑な協調運動であり、食物を認識し、咀嚼し、食塊を形成し、気道に入り込まないように口腔から咽頭や食道を介し胃に送り込む一連の運動である。食物の物性や量や姿勢などの条件の変化に適応し制御されている。嚥下障害とは、これらの条件の変化に対する適応能力が低下することにより、食物の適切な輸送が行うことができなくなる障害である。

加齢性変化や神経筋疾患や脳卒中や頭頸部手術後による嚥下障害患者に対し、臨床現場では嚥下造影検査や嚥下内視鏡検査を用いて嚥下障害を診断し、代償手段として食形態の変更や経口摂取姿勢の変更、およびリハビリテーションの手法を提案する。古典的に行われてきた嚥下造影検査では嚥下を三次元的に観察することが困難であった。また、嚥下内視鏡検査でも咽頭収縮により嚥下時の食塊の三次元的な挙動の観察は困難であった。この問題に対する解決策として嚥下運動を三次元的に観察する手法として CT や cine MRI を用いた観察の報告がある。

一方で、実際に行われる検査の問題として、被験者の疲労による嚥下運動の再現性の低下が挙げられる。臨床現場では患者の体力面の制約から必ずしも十分な条件の検討ができない場面に出会う。この問題に対する、解決策として姿勢や粘度などの条件の最適化を図るためのシミュレーションを行いたいと考えた。しかし現時点ではシミュレーションを行うための環境が一般化されておらず、シミュレーションを開発することで姿勢や粘度の変化による食塊の挙動の変化を明らかにするために本研究に着手した。

[方法] 東北大学病院耳鼻咽喉・頭頸部外科を受診した頭頸部癌患者から診療上得た画像情報から咽頭の嚥下運動モデルを作成した。咽頭の解剖学的な構造の変化がないケースとして、頬粘膜癌の患者を選択した。本患者は Penetration Aspiration Scale Score :1 の嚥下障害がない患者である。患者の CT から咽頭・舌・口蓋・喉頭の壁のデータからなる CG を作成し、嚥下造影検査を元に動きを再現し、三次元の嚥下運動モデルを作成した。粘度と姿勢の条件を変えつつ、舌背においた 5mL の食塊の挙動を嚥下運動に合わせて数値流体力学シミュレーションを行った。粘度は National Dysphagia Diet にて thin-liquid bolus として定義される範囲にある 0.0020Pa.s から Honey-like bolus として定義される範囲にある 1.0Pa.s の範囲で変化させた。姿勢は直立した姿勢から前傾 30° および後傾 15° の範囲で変化させた。シミュレーションの計算手法として格子ボルツマン法を採用した。

[結果・考察]シミュレーション結果では、粘度が高いほど各時刻における咽頭に存在する食塊が増加した。また、食塊はいずれの姿勢や粘度でも喉頭蓋谷で左右に分かれて通過したことから、喉頭の形態と運動は嚥下の安定性を高めるのに重要であることが示唆された。一方でシミュレーションでは粘度 $1.0\text{Pa}\cdot\text{s}$ において誤嚥する結果を得た。本モデルのもとになった頬粘膜癌患者は嚥下障害がなく、食事形態に制限がなく、現実の嚥下状態と差異が生じた。この原因として本シミュレーションでは粘度や姿勢の変化に対し、嚥下運動の変化による適応がないためであると考えられた。また、食塊の先端の位置を元となった嚥下造影検査と同一条件のシミュレーション結果とを比較すると、両者とも食塊は喉頭蓋の高さに進んだ後、いったん停留し下咽頭に流入するパターンは一致した。しかし、嚥下造影検査の結果に比べてシミュレーション結果のほうが喉頭蓋の高さへの流入が急峻であり、喉頭蓋の高さから下咽頭への流入が緩やかであった。これは実際の嚥下運動では中咽頭に食塊をとどめ喉頭の動きに合わせて喉頭蓋の高さに送り込む制御と下咽頭に流入するとき食塊に対して急峻に送り込む駆動力とが存在し、本モデルではこのような制御を実現できていないためと考えられた。

[結論]咽頭の嚥下運動モデルを作成し、姿勢や粘度の変化に対する食塊の挙動や咽頭に存在する量の変化を可視化することができた。数値流体力学を用いた食塊の挙動の解析は嚥下運動を理解する新たな方法となりうる。

審 査 結 果 の 要 旨

博士論文題目嚥下運動下の嚥下物の数値流体力学的解析.....

所属専攻・分野名医科学専攻・耳鼻咽喉・頭頸部外科分野.....

学籍番号B5MD5135.....氏名太田 淳.....

現在、嚥下運動は一般的に嚥下造影検査により評価される。しかし実際に行われる検査の問題として、被験者の疲労による嚥下運動の再現性の低下が挙げられる。シミュレーションは患者の疲労による検査結果への影響を排除した検討を可能にする方法であるが、既存のシミュレーション環境が存在しないという問題点がある。太田氏の論文は、この嚥下運動のシミュレーションを開発し、検討の第一歩として姿勢や粘度の変化による食塊の挙動の変化を明らかにすることを目的としている。

本論文で太田氏は咽頭期の嚥下機能に低下のない頬粘膜癌患者に着目し、嚥下造影検査と頸部 CT を元に嚥下運動のモデルを作成し、格子ボルツマン法を用いて、嚥下運動中の嚥下物の流体シミュレーションを行った。

シミュレーション結果では、1) 粘度が高いほど食塊は咽頭を遅れて通過した。また、2) 食塊はいずれの姿勢や粘度でも喉頭蓋谷で左右に分かれて通過したことから、喉頭の形態と運動は嚥下の安定性を高めるのに重要であることが示唆された。3) 一方で食塊の先端の位置をシミュレーション結果と嚥下造影検査とで比較すると食塊は喉頭蓋の高さに進んだ後、いったん喉頭蓋の高さで停留し下咽頭に流入するパターンは一致するものの、シミュレーション結果よりも実際の結果のほうが喉頭蓋の高さへの流入が緩やかであり、喉頭蓋の高さから下咽頭への流入が急峻であった。これは実際の嚥下運動では中咽頭に食塊をとどめ、喉頭の動きに合わせて喉頭蓋の高さに送り込む制御と下咽頭に流入するとき食塊に対して急峻に送り込む駆動力とが存在し、本モデルではこのような制御を実現できていないためと考察されている。一方、実際の患者では粘度や姿勢などの条件の変化に対応するような嚥下運動の変化による適応が存在し、今後のシミュレーションの発展は条件の変化に対する適応を考慮する必要性がある。

以上のように本論文は、嚥下運動中の嚥下物の流体シミュレーション環境を新規に開発し、姿勢や粘度の変化に対する食塊の挙動や咽頭に存在する食塊量の変化を可視化することを可能にした点で、新規性に富み、将来の嚥下診療を発展させる意義をもつ。

よって、本論文は博士（医学）の学位論文として合格と認める。